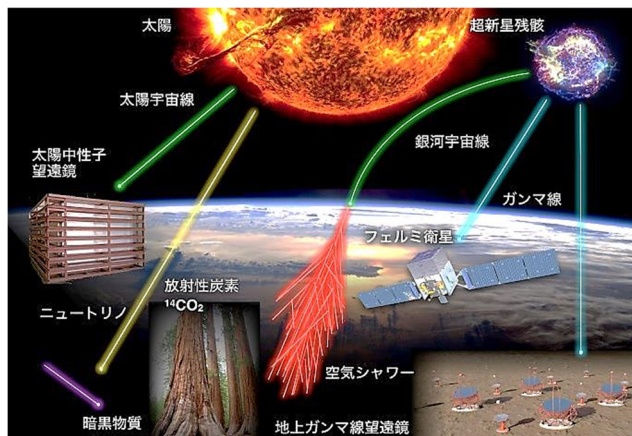


宇宙線研究部



研究テーマ・キーワード

- 宇宙線の加速機構とその伝搬の解明
 - ・宇宙ガンマ線観測
 - ・太陽中性子観測
- 宇宙線と地球との相互作用
 - ・超高エネルギー宇宙線の核相互作用の研究
 - ・宇宙線生成核種による過去の宇宙線変動の解明
- 宇宙線による宇宙素粒子物理学
 - ・暗黒物質・ニュートリノの研究

宇宙線は宇宙から地球に降り注いでいる自然の放射線である。宇宙線の主成分は陽子であり、電子や原子核などの荷電粒子、ガンマ線などの高エネルギー光子やニュートリノも含む。宇宙のどこかで生まれた宇宙線は、星間磁場や太陽・地球の磁場による影響を受けながら地球へ到達する。宇宙線研究部では、フェルミ・ガンマ線宇宙望遠鏡（フェルミ衛星）やチェレンコフ望遠鏡アレイ（Cherenkov Telescope Array: CTA）実験による宇宙ガンマ線の観測、また世界各地の高山に設置した太陽中性子観測網により、宇宙線の起源と宇宙プラズマに普遍的な粒子加速のメカニズムの解明を進めている。

宇宙線はまた、地上の実験では到達できない超高エネルギーの現象や未知の素粒子についてヒントを与えてくれる天然の素粒子実験場である。宇宙線研究部では、超高エネルギー宇宙線が大気原子核と衝突して起こす原子核反応を検証するため、Large Hadron Collider（LHC）や Relativistic Heavy Ion Collider（RHIC）などの衝突型加速器を用いた LHC forward（LHCf）実験、RHIC forward（RHICf）実験を行い、宇宙線の空気シャワー現象の解明を進めている。また、岐阜県神岡の地下においてスーパーカミオカンデによるニュートリノの研究や、将来計画のハイパーカミオカンデを推進するとともに、液体キセノンを用いた神岡地下での XMASS 実験や、イタリアのグラン・サッソ国立研究所での XENONnT 実験で、宇宙暗黒物質の直接検出に挑んでいる。

ガンマ線は地球大気に突入して電離を起こし、さらに原子核反応により放射性炭素 14 などの宇宙線生成核を作り出しながら、そのエネルギーを地表まで持ち込む。年輪や氷床コアに残された宇宙線生成核を調べることで、過去に行った突発的な宇宙線増加現象や、太陽や地球の磁場変動史の解明を行っている。

2021 年度の主な活動

ガンマ線観測による宇宙ガンマ線源の探求

ガンマ線は、暗黒物質の相互作用や宇宙線と星間ガスの相互作用によって生成されと考えられているため、宇宙線・星間ガスの分布や性質の研究や暗黒物質探査に適している。

現在、100 GeV 以下から 100 TeV 以上のエネルギーの宇宙ガンマ線を観測できる次世代ガンマ線観測天文台 CTA の開発を進めている。我々は、CTA のなかでも小口径望遠鏡に採用されたシリコン光電子増倍素子（SiPM）の開発、調達、校正に責任を持つことになっている。SiPM の利点の一つに月夜でも運用できるため、2 倍程度の観測時間の増加が可能になることがあることから、強い背景光下での SiPM の特性を調査した。強い背景光下では SiPM の電流が増加するため、バイアス回路の直列抵抗における電圧降下や温度上昇による降伏電圧の変化によって、SiPM 出力信号のパルス振幅の低下を招くと予想される。さらに、背景光による SiPM の信号出力後の回復期に信号光を受光すると出力信号のパルス振幅が低下する。最小の直列抵抗で測定すると、満月相当の背景光強度におけるパルス振幅は 7% 程度減少することが判明した。温度上昇の影響が 4% で最も大

きく、直列抵抗による電圧降下は 1.5%であった。この 2 つの効果で 7%の振幅低下のうちの 5.5%を説明できる。回復期間中に受光する効果をシミュレーションしたところ、残りの 1.5%をちょうど説明できることが分かった。

CTA では、高い光検出効率、画素の大きさを小さくできること、月夜でも観測可能なことから、SiPM を大口径望遠鏡に採用することを考慮している。しかし、SiPM は背景光の強度が高い赤色の波長領域での光検出効率が高いため、背景光の影響を受けやすい。我々は背景光を低減するために集光器に赤色フィルターを蒸着することを提案している。集光器を試作し、そのフィルター特性を確認した。また、ガンマ線検出効率をシミュレーションし、赤色フィルターで 20 GeV のガンマ線検出効率が 20%以上向上することを確認した。さらに、画素の大きさを半分にすることで、検出効率の向上が 30%となることが判明した。

太陽中性子望遠鏡による太陽高エネルギー粒子加速機構の解明

本研究は、太陽表面における爆発的なエネルギー解放現象であるフレアに伴う高エネルギーイオンの加速機構を、地上で中性子 (>100 MeV) を観測することにより解明しようとするものである。太陽表面で加速された高エネルギーイオンそのものは、惑星間空間磁場により散乱されるため、地上で観測できても太陽表面における加速時の情報を知ることは困難である。一方、加速イオンと太陽大気との相互作用で生成される中性子やガンマ線は、磁場の影響を受けずに直進するので、加速機構を研究するために有効である。しかし、中性子は質量をもつので、エネルギーによって太陽-地球間に要する時間が異なる。さらに、中性子は地球大気中で減衰を受けるので、高山で、かつ昼間しか検出するチャンスはない。本研究所では、他の研究グループとの共同で、経度の異なる世界 7 箇所の高山で、太陽中性子 24 時間観測網を実現し、観測を継続してきた。これまでの観測で、1) 中性子の生成時間が X 線やガンマ線などの電磁波と同時であると仮定すると、太陽表面でのイオン加速は統計加速であること、2) 中性子の生成時間が硬 X 線と比べて長時間であるイベントが最低 1 イベントあること、3) 太陽フレアで中性子が得るエネルギーは、軟 X 線の全エネルギーの 0.1 %を超えないこと、が分かってきた。

2013 年には、メキシコの高山シェラネグラ (4,580 m) に既存の太陽中性子望遠鏡と比較して、中性子に対する検出感度と中性子のエネルギー分解能に格段に優れた新検出器 SciCRT (SciBar Cosmic Ray Telescope) を設置し、2015 年から本格的な観測を開始した。SciBar は加速器実験で用いられていた検出器で、SciBar を宇宙線検出器として用いることは、京都大学と高エネルギー物理学研究所 (KEK) などのご厚意で実現した。SciCRT では太陽中性子観測のほかに、方向別の宇宙線頻度の時間変動の観測を行っていて、惑星間空間磁場の変動を調べている。SciCRT による太陽中性子観測は、中性子の生成時間を仮定することなく、イオンの加速効率を求めることを目的としている。モンテカルロシミュレーションによれば中性子の生成時間が 30 秒以下の瞬間生成か、5 分以上継続しているか区別しながら、統計加速かショック加速の区別ができる。これは、SciCRT 以前の太陽中性子検出器では行えない。SciCRT の運用以来、2021 年度も含め、そのようなイベントは検出されていない。

太陽活動は 2020 年のうちに、第 24 太陽活動期から第 25 太陽活動期に移行した。活動期は、太陽活動の極小から極小までで定義されている。SciCRT は 2015 年以降順調にデータ取得を継続してきたが、2020 年 4 月からメキシコで新型コロナウイルス COVID-19 による感染が広がり始めてから、安定したデータ取得が困難になった。2021 年 5 月からの 3 ヶ月間に一旦はデータ取得を再開できたが、その後再び長期にわたりデータ取得がストップした。2022 年 2 月になると、ようやく、方向別の宇宙線頻度を記録することができるようになった。中性子のデータ取得を同時に再開することはできなかったが、今年度末または来年度初めには再開できる段取りになっている。

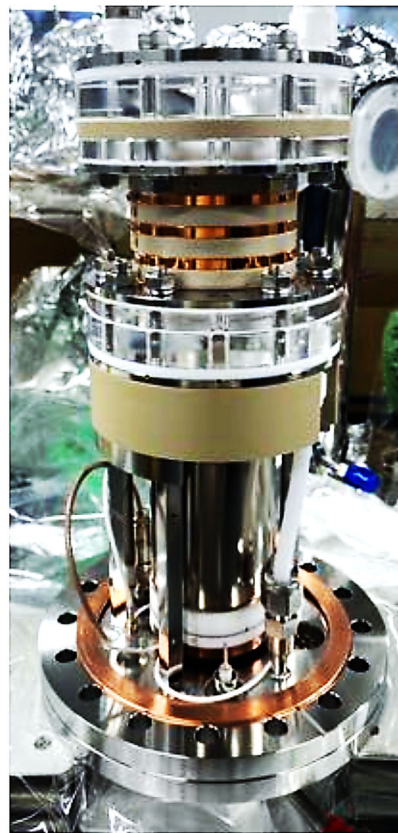
本研究は、中部大学、信州大学、東京大学宇宙線研究所、JAXA 宇宙科学研究所、防衛大学校、愛知工業大学、日本原子力研究開発機構、メキシコ自治大学などとの共同研究である。

地下実験でのニュートリノと暗黒物質の研究

ニュートリノは質量をほとんど持たず、中性で弱い相互作用のみで散乱する貫通力の強い素粒子である。3種類のニュートリノが量子力学的に混ざり合っ起こすニュートリノ振動により、ニュートリノの質量などニュートリノの性質を探る事ができる。宇宙線研究部では、神岡地下施設でのスーパーカミオカンデ実験でのニュートリノ研究を行うと共に、有効体積を8倍大型化した将来計画ハイパーカミオカンデ実験を推進している。

本年度は、大気ニュートリノ振動を用いたニュートリノ非標準相互作用の探索結果について、学位論文となる成果を創出した。これはエジンバラ大学との共同学位プログラムによるものである。また、大気ニュートリノ生成モデルの高度化を進め、加速器実験データの導入を行い、従来のモデルが持つ中央値と系統誤差との比較を行った。

宇宙空間には、相互作用が弱く観測にかかりにくい暗黒物質素粒子WIMPが存在すると考えられており、その初検出に向けて多くのプロジェクトが世界中で進行中である。宇宙線研究部では、イタリア・グランサッソー地下施設での液体キセノンを用いた XENONnT 実験での暗黒物質直接探索と、その将来計画である DARWIN 実験に向けた検出器開発を行っている。本年度は、コロナ禍の中、現地での検出器建設が完了し試運転を行っており、リモートでの液体キセノン導入監視シフトや Time Projection Chamber (TPC) 検出器、中性子反動時検出器の試運転データの解析に従事している。また、将来の液体キセノン暗黒物質検出器に向けて、薄膜高抵抗透明電極を開発し、これをドリフト電場用電極とした電子ドリフトに成功した。また、液体キセノンでの SiPM 光検出器の性能評価や、SiPM を光電子増幅に用いた新しいハイブリッド光電子増倍管の開発を行った。



密閉石英容器を内包した0.1L液体キセノン TPC プロトタイプ検出器。

宇宙線生成核種を用いた過去の宇宙線変動の研究

地球へ降り注ぐ宇宙線は、大気と相互作用を起こして様々な二次粒子を生成する。その中でも半減期の長い宇宙線生成核種 (^{14}C や ^{10}Be など) は、過去に地球へ到達した宇宙線強度の優れた指標として用いられている。我々は樹木年輪の ^{14}C 濃度や氷床コアの ^{10}Be 濃度を測定し、過去の宇宙線変動を調査している。これまでに、屋久杉などの ^{14}C 濃度測定から西暦 774 年、西暦 993 年、紀元前 660 年頃の宇宙線増加イベントを検出してきた。これらの宇宙線急増の原因は、Solar Energetic Particle (SEP) イベントと考えられており、その規模は観測史上最大の SEP イベントの数十倍に及ぶと見積もられている。このような大規模な太陽面爆発が現在発生すると、現代社会に甚大な影響が及ぶと危惧されている。我々は、大規模な SEP イベントの発生頻度等の調査のため、過去 1 万年間を対象に樹木年輪中 ^{14}C 濃度を測定し、西暦 774 年のような大規模 SEP イベントを探索している。

本年度は、米国、フィンランド、スイス産樹木サンプルを用いた ^{14}C 分析から、紀元前 5410 年の宇宙線急増イベントを報告した (Miyake et al., 2021)。他の SEP 起源とされるイベントの ^{14}C 濃度変動との類似性から紀元前 5410 年のイベントの原因も大規模な SEP イベントである可能性がある。また、今回用いた異なる地域の樹木試料の ^{14}C データには、先行研究で報告されている地域差 (高緯度ほど高い ^{14}C 濃度) が認められた。

さらに、紀元前 5480 年頃の南極ドームふじ氷床コアの ^{10}Be と ^{36}Cl の高時間分解能データを取得し、西暦 774 年イベントの ^{10}Be 、 ^{36}Cl 変動と比較することで、紀元前 5480 年付近に報告された宇宙線大増加イベントの原因について調査した。その結果、紀元前 5480 年頃の宇宙線生成核種データは、銀河宇宙線の変化によって説明できる可能性を示した (Kanzawa et al., 2021)。そのような原因の一つとして、急激に太陽活動が低下する特殊な太陽活動低調期 (Grand Solar Minimum) が考えられ、他の氷床コアの ^{10}Be と ^{36}Cl を用いたさらなる原因追究が重要となる。

加速器を用いた宇宙線相互作用の研究

高エネルギー宇宙線はどこでどのように加速されているか？この間に答えを得るべく観測が世界中で様々な手法で実施されている。高エネルギー宇宙線の観測は、大気と衝突を繰り返して生じる粒子シャワー現象（空気シャワー）を地上から観測することで行われている。観測される空気シャワーから元の宇宙線の情報を抜き出すためには、宇宙線と大気との高エネルギー相互作用を理解することが不可欠であり、宇宙線の化学組成（陽子、鉄原子核など）では使用する相互作用モデルによって観測データの解釈が異なるという問題が生じている。そこで、我々は欧州原子核研究機構（CERN）にある世界最大の粒子加速器 LHC と米国のブルックヘブン国立研究所にある RHIC 加速器を用いて、高エネルギーハドロン相互作用の研究を行っている。

我々はこれらの加速器での陽子陽子衝突で超前方領域に生成される高エネルギー γ 線や中性子などを測定している。それぞれの加速器を用いた実験を LHCf 実験と RHICf 実験と呼び、これらはイタリアなどとの国際共同研究である。LHCf 実験では 2010 年から LHC 加速器での重心系衝突エネルギーが 900 GeV から 13 TeV までの陽子-陽子衝突や陽子-原子核衝突の測定を行ってきた。また、RHIC 加速器を用いた RHICf 実験は、2017 年に衝突エネルギー 510 GeV の陽子-陽子衝突の測定を行った。これらの取得したデータを解析して、これまでに超前方領域の粒子生成について明らかにしてきた。2021 年度は、RHICf 実験で取得したデータ解析を進めて、光子の微分生成断面積の測定結果を発表し、この結果と LHCf 実験の 7 TeV と 13 TeV の高い衝突エネルギーでの測定結果と比較することによって、ファインマンスケールリングと呼ばれるスケールリング則が高エネルギー衝突でも実験の誤差範囲内で成り立っていることを示した。また、これ以外にも最前方パイゼロ中性子解析や ATLAS 実験と LHCf 実験の共同解析などを進めている。

LHCf 実験と RHICf 実験はともに次期測定を計画している。特に LHCf 実験は 2022 年の 9 月に LHC 加速器での陽子-陽子衝突の再測定を予定しており、この測定準備を現在は進めている。この準備作業のマイルストーンの一つとなっていたのが CERN-SPS 加速器を用いた検出器のビームテストである。このテストでは、検出器の経年変化の確認、アップグレードした読み出しシステムの動作テスト、ATLAS-ZDC 検出器との共同測定の性能評価を行った。新型コロナウイルスの影響によってビームテスト実験に参加できる人数が制限される厳しい状況ではあったが、ビームテスト実験を無事完了し、大きな経年変化がないことと、期待通りの性能が出ていること確認することができた。



CERN-SPS 加速器を用いたビームテスト実験の様子。